

Научная статья

УДК 597.42

<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-4-62-71>

EDN VSEFEN

Оценка токсичности водного экстракта бурой водоросли *Laminariocolax aecidioides* с помощью lux-биосенсоров и микроядерного теста при его использовании в индустриальной аквакультуре

А. А. Климук¹, А. Д. Жандалгарова^{2✉}, Т. Л. Калита³,
Е. В. Игонина⁴, Е. О. Кузьменко⁵

^{1,3,5}Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет),
Москва, Россия

²Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, zhandalgarova@mail.ru✉

⁴Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова Российской академии наук,
Москва, Россия

Аннотация. Экстракты бурых макроводорослей широко применяют в фармакологии, косметологии и пищевой промышленности, однако добыча сырья, с одной стороны, подрывает природные популяции, а с другой – при плантационном их выращивании является дорогостоящим производством. В качестве перспективного объекта для приготовления экстрактов рассматривается нитчатая быстрорастущая водоросль *Laminariocolax aecidioides*. Предполагается использовать данный экстракт в качестве биологически активной добавки при кормопроизводстве для индустриальной аквакультуры и поэтому очень важно проверить его токсичность на клетки прокариот и эукариот. Действие экстракта на прокариотические клетки было оценено с помощью lux-биосенсоров *Escherichia coli* K12 MG1655 (pColD-lux – повреждение ДНК и pSoxS-lux – развитие окислительного стресса), а эукариотические клетки – методом регистрации ядерных аномалий в крови костных рыб (микроядерный тест). Тестирование проводилось на сеголетках африканского клариевого сома, перспективного объекта индустриальной аквакультуры. Выявлено, что экстракт бурой водоросли *L. aecidioides* напрямую не повреждал ДНК и не вызывал окислительный стресс, но вызывал гибель бактериальных клеток в высоких концентрациях (50 и 100 %), при этом результаты микроядерного теста показали отсутствие токсического воздействия экстракта во всех вариантах опыта на эукариотические клетки крови *Clarias gariepinus*, частота микроядер не превышала 1,5 %. Количество микроядер может достигать значений 30 % на фоне отсутствия генотоксического эффекта, поэтому можно предположить, что диапазон встречаемости микроядер в эритроцитах сомов, принятый за отсутствие генотоксического эффекта, составляет 0–30 % на 1 000 клеток крови.

Ключевые слова: экстракт, lux-биосенсоры, pColD-lux, pSoxS-lux, бурые водоросли, *Laminariocolax aecidioides*, генотоксичность, окислительный стресс, микроядерный тест, ядерные аномалии

Для цитирования: Климук А. А., Жандалгарова А. Д., Калита Т. Л., Игонина Е. В., Кузьменко Е. О. Оценка токсичности водного экстракта бурой водоросли *Laminariocolax aecidioides* с помощью lux-биосенсоров и микроядерного теста при его использовании в индустриальной аквакультуре // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 1. С. 62–71. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-1-62-71>. EDN VSEFEN.

Original article

Toxicity assessment of the aqueous extract of brown algae *Laminariocolax aecidioides* using lux biosensors and micronucleus test when used in industrial aquaculture

A. A. Klimuk¹, A. D. Zhandalgarova^{2✉}, T. L. Kalita³,
E. V. Igonina⁴, E. O. Kuzmenko⁵

^{1,3,5}K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University),
Moscow, Russia

²Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, zhandalgarova@mail.ru✉

⁴Vavilov Institute of General Genetics Russia Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Abstract. Extracts of brown macroalgae are widely used in pharmacology, cosmetology and the food industry, however, extraction of raw materials, on the one hand, undermines natural populations, and on the other hand, during plantation cultivation is an expensive production. The filamentous fast-growing algae *Laminariocolax aecidioides* is considered as a promising object for the preparation of extracts. It is supposed to use this extract as a biologically active additive in feed production for industrial aquaculture and therefore it is very important to check its toxicity on prokaryotic and eukaryotic cells. The effect of the extract on prokaryotic cells was evaluated using *Escherichia coli* K12 MG1655 lux biosensors (pColD-lux - DNA damage and pSoxS-lux - development of oxidative stress), and eukaryotic cells – by registering nuclear anomalies in the blood of bony fish (micronucleus test). Testing was carried out on fingerlings of the African clary catfish, a promising object of industrial aquaculture. It was revealed that the extract of the brown algae *L. aecidioides* did not directly damage DNA and did not cause oxidative stress, but caused the death of bacterial cells in high concentrations (50 and 100%), while the results of the micronucleus test showed the absence of toxic effects of the extract in all experimental variants on eukaryotic blood cells of *Clarias gariepinus*, the frequency of micronuclei did not exceed 1.5%. The number of micronuclei can reach values of 30% against the background of the absence of a genotoxic effect, therefore, it can be assumed that the range of occurrence of micronuclei in red blood cells of catfish, taken for the absence of a genotoxic effect, is 0-30% per 1,000 blood cells.

Keywords: extract, lux biosensors, pColD-lux, pSoxS-lux, brown algae, *Laminariocolax aecidioides*, genotoxicity, oxidative stress, micronucleus test, nuclear anomalies

For citation: Klimuk A. A., Zhandalgarova A. D., Kalita T. L., Igonina E. V., Kuzmenko E. O. Toxicity assessment of the aqueous extract of brown algae *Laminariocolax aecidioides* using lux biosensors and micronucleus test when used in industrial aquaculture. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry.* 2024;1:62-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-1-62-71>. EDN VSEFEN.

Введение

Согласно технологии получения водных экстрактов из бурых водорослей в их вытяжке содержится целый комплекс биологически активных веществ (БАВ): фукоидан, ламинаран, альгиновая кислота, маннит, йод, минеральные вещества [1, 2], флоротаннины [3].

Ламинаран стимулирует врожденный иммунитет у животных [4], обладает противоопухолевой и антиоксидантной активностью (эффективно инактивирует свободные радикалы), оказывает ингибирующее действие на бактерии [5], участвуя в индукции генов, кодирующих различные белки, связанные с патогенезом и антимикробными свойствами [6, 7]. Фукоидан ингибирует формирование гидроксильных и супероксидных радикалов [8], проявляет антиопухолевую [9] и антибактериальную активность [10]. Флоротаннины – фенольные метаболиты только бурых водорослей – имеют полимерную структуру, хорошо растворяются в воде, прочно связываются с биополимерами, хелатируют

двухвалентные металлы – проявляют антиоксидантную активность [11].

Экстракты бурых водорослей широко применяются в фармакологии, косметологии и пищевой промышленности. В проведенных исследованиях они были рассмотрены в качестве биологически активных добавок при кормопроизводстве для индустриальной аквакультуры. До настоящего времени российская аквакультура ориентировалась на импорт европейских комбикормов, премиксов, компонентов кормов (рыбная мука, жиры), витаминов и ферментов. Однако интенсивные темпы развития рыбководства в России диктуют необходимость развивать кормопроизводство на основе отечественного сырья, разрабатывать рецептуры всей линейки кормов – от стартовых до продукционных [12]. Было предположено, что экстракты бурых водорослей по своим свойствам могут играть роль кормовых добавок для повышения выживаемости молоди и увеличения продукционных показателей рыб.

Для получения экстрактов в промышленных масштабах используют крупные талломы водоросли из порядков Laminariales (*Laminaria digitata* и *Saccharina latissima*) и Fucales (*Fucus vesiculosus*), что требует значительных затрат на их плантационное выращивание или сбор растений из природных популяций, приводит к негативным экологическим последствиям для водорослевых сообществ [13]. Однако недавнее исследование А. В. Скрипцовой показало, что перспективным сырьем для получения необходимого количества БАВ нужного качества могут быть нитчатые бурые водоросли из порядка Ectocarpales рода *Streblonema* [14]. В этом случае появляется возможность выращивать водоросли в промышленном масштабе в биореакторах и получать БАВ за короткий срок и с наименьшими финансовыми затратами.

Среди нитчатых представителей порядка Ectocarpales наибольший интерес для получения БАВ при культивировании в биореакторах представляет морская эндофитная водоросль *Laminariocolax aecidioides*. Данный вид известен как паразит ламинариевых плантаций, вызывающий морфологические аномалии у своего хозяина (темные пятна на пластине, деформации пластины и стволика) и снижающий качество продукции; при этом он встречается повсеместно в северном полушарии [15].

Получение БАВ водорослевого происхождения из нетрадиционного сырья требует тщательной проверки его на биологическую безопасность, при этом важно понимать действие этих веществ на прокариотические и эукариотические клетки в отдельности. Как правило, влияние токсинов проявляется в повреждении ДНК клеток или развитии процессов окислительного стресса [16].

Действие различных токсинов на прокариотические клетки сейчас часто оценивают с помощью lux-биосенсоров – генетически модифицированных бактерий вида *Escherichia coli* штамма K12, содержащих рекомбинантные плазмиды с lux-опероном люминесцирующей бактерии *Photobacterium luminescens*, слитым с промоторами генов супероксиддисмутазы *soxS* (pSoxS-lux), колицина-D *cdsA* (pColD-lux) и др. Интенсивность люминесценции этих штаммов позволяет быстро регистрировать про- и антиоксидантную активность (окислительный стресс), индукцию SOS-ответа при повреждении или остановке синтеза ДНК (генотоксичность) у прокариот [17, 18].

Комплексный ответ на токсины у рыб (повреждение ДНК эукариотических клеток, окислительный стресс и др.) недавно было предложено оценивать с помощью модификации микроядерного теста, где помимо частоты встречаемости микроядер учитывалось появление различных ядерных аномалий в эритроцитах рыб вида *Danio rerio* [19]. Так как предполагается использовать проверяемый экстракт бурых водорослей в качестве компонента кормов для индустриальной аквакультуры, микроядерный тест и, соответственно, действие экстракта

на эукариотические клетки были проведены на особях африканского клариевого сома (*Clarias gariepinus*), выращиваемых в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ). Следует отметить, что возможность изучения появления микроядер в эритроцитах непосредственно на востребованных объектах аквакультуры, таких как африканский клариевый сом *Clarias gariepinus*, толстоголовый голянь *Pimephales promelas* и радужная форель *Oncorhynchus mykiss*, была показана ранее многими исследователями при проверке кормовых добавок на генотоксичность. В связи с этим установлено, что регистрация микроядер, а также других ядерных аномалий (модификация микроядерного теста) при использовании экстракта *Laminariocolax aecidioides* в качестве кормовой добавки для африканского клариевого сома позволит оценить его действие на эукариотические клетки.

Таким образом, целью данного исследования было тестирование водного экстракта эндофитной водоросли *Laminariocolax aecidioides* на генотоксичность и развитие окислительного стресса в клетках прокариотических и эукариотических клеток с помощью lux-биосенсоров и микроядерного теста соответственно.

Материалы и методы

Объект исследования. Морская эндофитная нитчатая бурая водоросль вида *Laminariocolax aecidioides* (Морской биобанк РК ННЦМБ ДВО РАН, регистрационный номер 506171) была выделена из талломов бурой водоросли *Undaria pinnatifida* в июне 2018 г. (залив Петра Великого, Японское море, Россия) и предоставлена для изучения сотрудниками ФГБУН Национального научного центра морской биологии им. А. В. Жирмунского Дальневосточного отделения Российской академии наук [15]. В настоящее время водоросль содержится в биоресурсной коллекции факультета биотехнологий и рыбного хозяйства ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет)» (МГУТУ им. К. Г. Разумовского (ПКУ)). Условия выращивания: температура 10 °С, освещенность 25 мкмоль/м² с⁻¹, фотопериод $L : D = 12 : 12$, еженедельная смена искусственной морской среды (обогащенная ES).

Приготовление экстракта. Свежие водоросли *L. aecidioides* экстрагировали дистиллированной водой (водоросли – дистиллированная вода, 1 : 5 г/мл) в течение 8 ч при комнатной температуре, нагревали до 80 °С и выдерживали в течении 30 мин. Полученный горячий экстракт фильтровали и охлаждали по методике Л. Х. Вафиной, А. В. Подкорытовой [2].

В экспериментах использовали неразведенный экстракт, приняв его за 100 % (100 мл). Для получения конечных разведений 100 %-й экстракт разводили дистиллированной водой до концентраций 50; 10; 0,1 и 0,01 %.

Лух-биосенсоры. В исследовании были использованы два lux-биосенсора на основе штамма *E. coli* K12 MG1655: pColD-lux и pSoxS-lux, несущие рекомбинантную плазмиду с lux-опероном (*luxCDABE*) люминесцирующей морской фотобактерии *Photorhabdus luminescens*, транскрипционно слитой с промоторами генов колицина *colD* (*cda*) и супероксиддисмутазы *soxS* соответственно. Экспрессия lux-оперона в живых клетках *E. coli* приводит к биолюминесценции, интенсивность которой фиксировалась в ходе эксперимента.

Биосенсор pColD-lux люминесцирует в ответ на повреждение или остановку синтеза ДНК, т. е. характеризует уровень SOS-ответа бактерий на генотоксическое воздействие [17]. Интенсивность люминесценции биосенсора pSoxS-lux напрямую зависит от количества супероксид-анион-радикала, инициирующего развитие окислительного стресса в клетках [18].

Биосенсоры предоставлены Г. Б. Завильгельским и И. В. Мануховым (ФГБУ «Государственный научно-исследовательский институт генетики и селекции промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"», г. Москва), их генотипы приведены в статье В. Ю. Котовой с коллегами [16].

Культивирование бактерий производилось на жидкой среде Лурия-Бертани (LB), содержащей ампициллин в концентрации 100 мкг/мл. Для проведения экспериментов использовали ночные культуры биосенсоров pColD-lux и pSoxS-lux, которые инкубировали в течение 12 ч при 37 °С. Перед применением культуры биосенсоров pColD-lux и pSoxS-lux разводили свежей питательной средой LB до концентрации 10^7 мкл/мл, используя для коррекции денситометр DEN-1B (Biosan), и выращивали с аэрацией при 37 °С до ранней экспоненциальной фазы в течение 2 ч.

Оценка генотоксического действия экстракта с помощью lux-биосенсоров. Ночные культуры бактерий переносили по 180 мкл в стерильные ячейки 96-луночных планшетов, в которые добавляли по 20 мкл тестируемого экстракта в концентрациях 100; 50; 10; 0,1 и 0,01 %. В качестве положительного контроля использовали диоксидин (0,001 моль/л) или паракват (0,0004 моль/л), в качестве отрицательного – дистиллированную воду. Диоксидин (1,4-диоксид 2,3-хиноксалиндиметанол, $C_{10}H_{10}N_2O_4$, «Новосибирскфарма») выбран в качестве положительного контроля, т. к. индуцирует SOS-ответ у биосенсора pColD-lux и является мутагеном, индуцирующим хромосомные aberrации. Паракват (N,N' -диметил-4,4'-дипиридиллиум дихлорид ($C_{12}H_{14}Cl_2N_2$, Sigma, USA)) индуцирует окислительный стресс в клетках живых организмов и регистрируется биосенсором pSoxS-lux, играя роль положительного контроля [18].

Экспериментальные планшеты инкубировали в термостате при 37 °С в течение 90 мин. Люминесценцию регистрировали с помощью микропланшет-

ного ридера Stat-Fax 4400, Awareness Technology Inc. (США). Интенсивность биолюминесценции выражали в относительных единицах светового потока (отн. ед.). Каждый из двух экспериментов на выбранных биосенсорах проводили 3 раза в 8-ми повторностях. Схема эксперимента представлена на рис. 1, а.

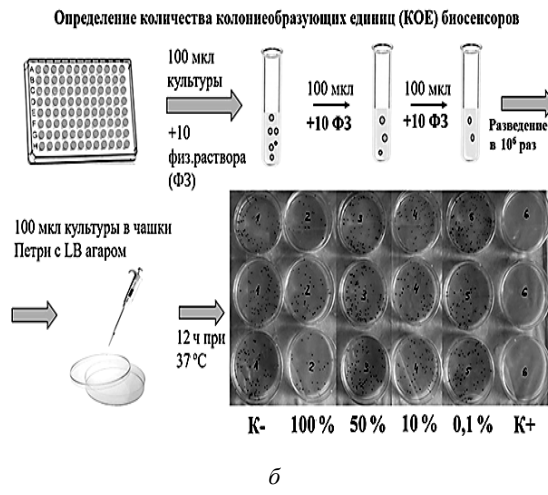
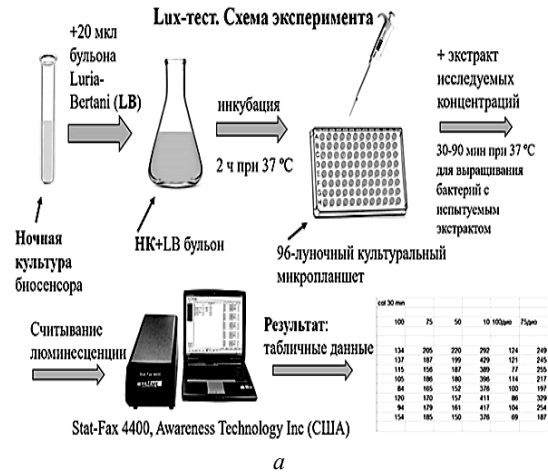


Рис. 1. Схема изучения с помощью lux-биосенсоров токсического действия экстракта из бурой водоросли *Laminariocolax aecidioides* на прокариотические клетки *Escherichia coli* (а) и оценки их выживаемости (б)

Fig. 1. Scheme of studying the toxic effect of the extract brown alga *Laminariocolax aecidioides* on *Escherichia coli* prokaryotic cells (a) and assessing their survival (b) with using lux biosensors

Оценка выживаемости бактерий *Escherichia coli*. К 2 мл разведенной ночной культуры каждого биосенсора pColD-lux и pSoxS-lux в ранней экспоненциальной фазе добавляли по 200 мкл экстракта в концентрациях 100; 50; 10; 0,1; 0,01 % дистиллированной воды (отрицательный контроль), диоксидина или параквата (положительный контроль) и инкубировали в течение 90 мин при 37 °С. Суспензии бактерий серийно разводили в миллион раз

Klimuk A. A., Zhandalagova A. D., Kalita T. L., Igolina E. V., Kuzmenko E. O. Toxicity assessment of the aqueous extract of brown algae *Laminariocolax aecidioides* using lux biosensors and microplate test when used in industrial aquaculture

в физиологическом растворе во всех вариантах опыта и высевали по 100 мкл в чашки Петри с агаризованной питательной средой LB. Через 18 ч инкубации при 37 °С подсчитывали число бактериальных колоний в каждой чашке Петри. Схема эксперимента по определению выживаемости графически представлена на рис. 1, б. Для оценки уровня SOS-ответа выживших бактерий рассчитывали удельную интенсивность биолюминесценции одной колониеобразующей единицы (L_v) в данном варианте опыта и умножали на 1 000, чтобы полученные значения легко интерпретировались:

$$L_v = \frac{L_o}{N_o} \cdot 1\,000,$$

где L_o – интенсивность люминесценции биосенсора опытной группы, отн. ед. (относительные условные единицы); N_o – число колониеобразующих единиц биосенсора, КОЕ.

Все эксперименты проводили 3 раза в 3-х независимых повторностях.

Оценка генотоксического действия экстракта на эукариотические клетки. В качестве тест-объекта были взяты особи африканского клариевого сома (*Clarias gariepinus*).

Экспериментальный рацион. За основу рациона были взяты два коммерческих комбикорма Coppens (Нидерланды): тонущий гранулированный комбикорм Coppens Intensiv (3 мм) и Coppens Suprime-21 (4,5 мм).

Приготовленный ранее экстракт из *L. acidoides* вводили в опытные корма путем распыления его по поверхности кормовых гранул и высушивания их при температуре 40 °С до первоначальных значений влажности. Подготовленные гранулы хранили в герметичном контейнере при температуре 4 °С и использовали их за одну неделю. Для напыления брали различные концентрации экстракта из расчета 5 мл 100 % экстракта на 95 г корма – 5 % и 15 мл 100 % экстракта на 85 г корма – 15 %. Контрольную группу сомов кормили кормом без экстракта.

Схема эксперимента. Сеголетки африканского клариевого сома (*Clarias gariepinus*) ($18,2 \pm 2$ г) выращивались в экспериментальных группах по 10 особей в емкостях $140 \times 110 \times 90$ см (1 000 л) в УЗВ (рН = 7,5–7,6; $T = 25$ °С; $L : D = 12 : 12$).

После недельной акклиматизации были сформированы 3 опытные группы сомов по 10 особей: контроль (корм без добавления экстракта), группа 5 % и группа 15 % (кормили с добавлением 5 и 15 % экстракта соответственно). Объем корма рассчитывался от биомассы рыб в УЗВ и составлял 4 %, поэтому объем корма корректировался по мере роста рыб. Всех рыб кормили 2 раза в сутки: в 10:00 и 18:00. Продолжительность эксперимента составила 60 сут.

Микроядерный тест. Микроядерный тест проводили в первый и последний день эксперимента. В указанные сроки из каждой исследуемой группы отбирали по 3 особи сомов одного размера, без видимых повреждений, анестезировали гвоздичным маслом в концентрации 0,05 % и отбирали из хвостовой вены образцы крови (1 мл).

Мазки крови изготавливались по стандартной методике [19]. Препарат крови высушивался на воздухе в течение 2–3 мин, далее фиксировался в смеси Никифорова (1 : 1 метиловый спирт : диэтиловый эфир) в течение 20 мин. Затем его окрашивали азур-эозином по Романовскому – Гимзе, для чего в 190 мл буферного раствора (рН = 7,0) добавляли 9 мл красителя, окрашивали препараты в течение 10 мин, затем трижды промывали дистиллированной водой и высушивали в стерильных условиях в течение 30 мин. Препараты просматривались под световым микроскопом Olympus BX53 (Olympus Corporation, Япония) с окулярной приставкой Carl Zeiss ERc 5s (Zeiss, Германия).

Частота встречаемости микроядер и ядерных аномалий в эритроцитах *Clarias gariepinus* определялась согласно методике [19]. Частота встречаемости микроядер, принятая как генотоксический эффект на модели *Danio rerio*, составляет 5 % на 1 000 клеток крови. Помимо микроядер (MN) учитывались следующие аномалии ядер: *notched nuclei* («деформированное ядро» – NN), *lobbed nuclei* («разрезанное ядро» – LN) и *blebed nuclei* («прикрепленное ядро» – BN).

Статистический анализ данных производился с использованием GraphPad Prism version 9.0 software (GraphPad, San Diego, CA, USA). Перед статистическим анализом все данные были проверены на нормальность распределения с помощью теста Колмогорова – Смирнова. Признаком достоверности индукции люминесценции считали статистически значимое превышение L_o над L_k , оцениваемое по t -критерию Стьюдента для независимых переменных, где L_k – интенсивность люминесценции контрольной пробы (в отн. ед.). Для всех данных рассчитывались среднее значение и стандартное отклонение.

Результаты

Действие экстракта на прокариотические клетки. Биосенсор *pColD-lux*. Относительная люминесценция при высоких (50 и 100 %) концентрациях экстракта снижалась и была ниже значений отрицательного контроля (К–) в 0,8 и 1,2 раза соответственно, тогда как люминесценция положительного контроля (диоксидина) была выше отрицательного в 27 раз (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Влияние экстракта *Laminariocolax acidioideis* на люминесценцию биосенсора pColD-lux
Effect of *Laminariocolax acidioideis* extract on the luminescence of the pColD-lux biosensor

Вариант опыта*	Количество КОЕ, × 10 ⁶	L ₀ , отн. ед.	L _v , отн. ед.
К–	92 ± 13	1 348 ± 93	0,015 ± 0,002
0,01	88 ± 6	1 389 ± 55	0,016 ± 0,0012
0,1	80 ± 4	1 367 ± 93	0,017 ± 0,0005
10	83 ± 6	1 299 ± 52	0,015 ± 0,0005
50	59 ± 14**	1 209 ± 51**	0,02 ± 0,002**
100	33 ± 8**	1081 ± 55**	0,035 ± 0,004**
К+	1 ± 0**	36 516 ± 3 551**	35,97 ± 3,36**

* «К–» – отрицательный контроль (дистиллированная вода), «К+» – положительный контроль (паракуват); ** значения, достоверно отличающиеся от отрицательного контроля.

Следует отметить, что уменьшение биолюминесценции бактерий при 50 и 100 % экстракта сопровождалось снижением в 2 раза выживаемости прокариотических клеток биосенсоров.

Расчет удельной люминесценции на 1 000 жизнеспособных бактерий (L_v) показал увеличение в 1,4 и 2,2 раза данного показателя в рассматриваемых вариантах опыта относительно отрицательного контроля, что говорит об увеличении SOS-ответа и повреждении ДНК в выживших клетках. Однако непосредственное разрушение ДНК диоксидином давало превышение значений удельной люминесценции на

3 порядка относительно отрицательного контроля, следовательно, можно утверждать, что экстракт не повреждал непосредственно ДНК клеток (нет генотоксического эффекта) и механизм его подавления бактериальных клеток другой.

Биосенсор pSoxS-lux. Относительная люминесценция биосенсора pSoxS-lux при воздействии экстракта водоросли в концентрации 50 и 100 % была соответственно в 2 и 3 раза ниже по сравнению с отрицательным контролем (табл. 2), тогда как паракуват (положительный контроль), напротив, усиливал люминесценцию тест-системы почти в 2 раза.

Таблица 2

Table 2

Влияние экстракта *Laminariocolax acidioideis* на люминесценцию биосенсора pSoxS-lux
Effect of *Laminariocolax acidioideis* extract on the luminescence of the pSoxS-lux biosensor

Вариант опыта	Количество КОЕ, × 10 ⁶	L ₀ , отн. ед.	L _v , отн. ед.
К–	114 ± 26	2 898 ± 97	0,024 ± 0,002
0,01	128 ± 19	3 028 ± 90	0,023 ± 0,002
0,1	118 ± 16	3 102 ± 69	0,026 ± 0,001
10	84 ± 27	2 696 ± 25	0,034 ± 0,004*
50	40 ± 13*	1 243 ± 62*	0,034 ± 0,005*
100	24 ± 6*	903 ± 55*	0,038 ± 0,003*
К+	1 ± 0*	5 304 ± 707*	5,3042 ± 0,4*

* Значения, достоверно отличающиеся от отрицательного контроля.

Выживаемость бактерий в вариантах опыта 50 и 100 % была примерно в 3 и 5 раз ниже, чем в отрицательном контроле, но выше, чем при воздействии паракувата. Выжившие после обработки водорослевыми экстрактами (10, 50 и 100 %) бактерии проявляли очевидные сигналы окислительного стресса. Уровень pSoxS-люминесценции у них был в 1,5 раза выше, чем в отрицательном контроле, и на 2 порядка ниже при действии паракувата.

Действие экстракта L. acidioideis в отношении эукариотических клеток. Выраженных аномалий эритроцитов клеток крови сомов не наблюдалось при добавлении исследуемых концентраций экстракта. Количество микроядер на первые сутки эксперимента у всех особей *Clarias gariepinus* в эксперименте было в пределах нормы, т. е. ниже 5 % на 1 000 клеток крови (табл. 3).

Klimuk A. A., Zhandalgarova A. D., Kalita T. L., Igolina E. V., Kuzmenko E. O. Toxicity assessment of the aqueous extract of brown algae *Laminariocolax acidioideis* using lux biosensors and micronucleus test when used in industrial aquaculture

Соотношение эритроцитарных ядерных аномалий на 1 000 клеток крови *Clarias gariepinus*, %

Ratio of erythrocyte nuclear anomalies per 1000 *Clarias gariepinus* blood cells

Сутки	Вариант опыта	MN	NN	LN	BN	TNA*
0	Контроль	0,87 ± 1,52	7,67 ± 9,36	1,42 ± 1,33	3,29 ± 3,66	13,27 ± 10,48
	5 %	1,24 ± 1,39	0,91 ± 1,58	0,72 ± 1,26	0,72 ± 1,26	3,62 ± 2,34
	15 %	0	8,17 ± 4,90	0	4,30 ± 7,46	12,48 ± 7,59
60	Контроль	0	0,91 ± 1,58	0,91 ± 1,58	0,91 ± 1,58	2,74 ± 4,76
	5 %	0	1,39 ± 2,40	1,15 ± 2,00	0	2,54 ± 2,23
	15 %	0	1,79 ± 1,57	0,81 ± 1,40	0,81 ± 1,40	3,41 ± 3,66

* TNA – общее число ядерных аномалий.

Общее число ядерных аномалий (TNA) варьировало от 0 до 25 %. Высокие значения этого показателя обусловлены большим числом деформированных (NN – около 8 %) и прикрепленных (BN – около 4 %) ядер. Типы ядерных нарушений, обнаруженных нами в эритроцитах сомов, представлены на рис. 2.

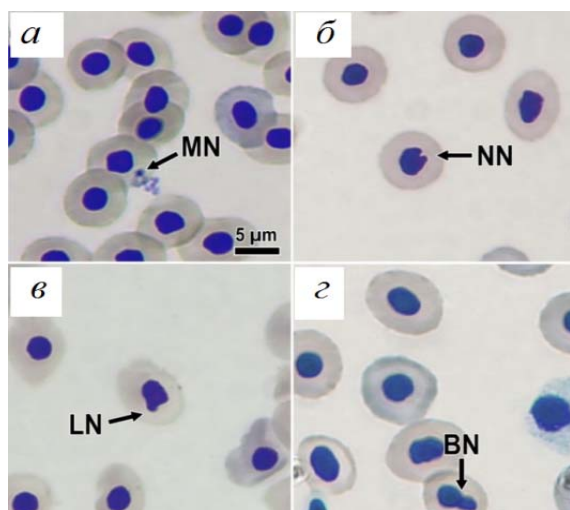


Рис. 2. Ядерные аномалии эритроцитов в крови *C. gariepinus*: MN – микроядро (а); NN – деформированное ядро (б); LN – разрезанное ядро (в); BN – прикрепленное ядро (г)

Fig. 2. Erythrocytes nuclear anomalies of *C. gariepinus* blood: MN – micronucleus (a); NN – notched nuclei (b); LN – lobbed nuclei (c); BN – blebed nucle (d)

Через 60 сут эксперимента общее число ядерных аномалий достоверно снизилось во всех вариантах опыта и колебалось от 0 до 7 %, включая снижение числа деформированных ядер (около 1–2 %) и прикрепленных ядер (до 1 %), а микроядер не было обнаружено ни в одном варианте опыта.

Комплексного токсического действия экстракта, выражающегося в появлении ядерных аномалий эритроцитов рыб, не выявлено.

Обсуждение

Результаты исследования показали, что экстракт из *L. aecidioides* напрямую не повреждает ДНК и не индуцирует окислительный стресс *Escherichia coli*, но в концентрации 50 и 100 % вызывает гибель бактериальных клеток. Это свидетельствует о том, что механизм воздействия экстракта на бактерии не связан с непосредственным разрушением биополимеров. Например, согласно данным Bernard Frutig и др. [6] и L. C. van Loon, E. A. van Strien [7], ламинан высших растений (1,3/1,6-β-D-глюкан) может участвовать в процессах регуляции экспрессии генов специфических белков, связанных с иммунной системой, тем самым повышая устойчивость растений к болезням. А исследования Jin Cai с коллегами [11] показали, что фукоиданы проявляют свою антибактериальную активность за счет хелатирования катионов металлов в структуре мембран клеточных стенок бактерий, что приводит к уменьшению их стабильности. Вероятно, экстракт *Laminariocolax aecidioides* демонстрирует выраженный антибактериальный эффект за счет прямого действия на мембраны бактерий.

Микроядерный тест не выявил генотоксического действия экстракта, т. к. уровень микроядерных аномалий не превышал 5 % на 1 000 клеток крови. Высокие показатели других ядерных аномалий в начале эксперимента и низкие во всех вариантах опыта в конце исследования (см. табл. 3), вероятно, говорят о содержании сомов в недостаточно благоприятных для них условиях освещения в начале эксперимента. В литературе по разведению сомов ранее не указывались условия освещения, но, по рекомендации ихтиологов Центра «Аквакультура» МГУТУ им. К. Г. Разумовского (ПКУ), емкости с сомами в первые сутки эксперимента были накрыты затеняющей сеткой. В результате освещенность была на уровне 2–8 мкмоль/м²·с⁻¹ (150–600 люкс), что положительно отразилось на состоянии сомов. Интересно, что многие исследователи указывали, что интенсивность эритропоэза у рыб (*Oncorhynchus mykiss*, *Salmo gairdneri*, *Clarias batrachus*) может зависеть от условий содержания [20]. Так, количество эритроцитов у костистых рыб зависит от температуры воды, концентрации кислорода, качества

кормов, а также от условий транспортировки (у *Syrp-
rinus carpio*) и высокой плотности посадки (у *Sparus
aurata*), но не от уровня освещения. Количество
всех зафиксированных ядерных аномалий в начале
исследования, вероятно, следует отнести к нор-
мальным показателям, т. к. особи африканского
клариевого сома активно поглощали корм и не име-
ли никаких морфологических изменений. Общее
снижение всех значений в конце эксперимента во
всех вариантах опыта говорит об отсутствии токсиче-
ского действия экстракта.

Следует отдельно отметить, что исследования
влияния токсикантов на клетки крови африканского
клариевого сома проводились многими исследова-
телями [21–23], однако в литературе отсутствуют
данные о нормативных значениях количества ядер-
ных нарушений клеток крови. Авторы ссылаются
на собственные контрольные значения микроядер
в клетках крови, поэтому количественные нормы
в исследованиях отличаются друг от друга. Так, при
изучении токсичности карбофурана (пестицид) на
гематологические показатели крови африканских
сомов концентрация микроядер не должна была
превышать 2 ‰ [21], для фентиона (инсектицид) –
30 ‰ [22], для аскорбиновой кислоты – 10 ‰ [23],
поэтому установление «нормы» ядерных аномалий
крови африканского клариевого сома требует даль-

нейших исследований.

Отсутствие генотоксического эффекта экстракта
Laminariocolax aecidioides на эукариотические клет-
ки ожидаемо и подтверждается другими исследова-
телями. Так, проведенный ранее анализ генотоксич-
ности неочищенного экстракта бурой водоросли
Dictyopterus membranacea на клетках С3А человека
микроядерным тестом показал отсутствие хромо-
сомных и геномных нарушений [24]. Генотоксич-
ность бурой водоросли *Stoechospermum marginatum*
исследовали также с помощью теста Эймса и мето-
дом ДНК-комет на мышах и не выявили значимых
кластогенных эффектов [25].

Заключение

Полученный экстракт из эндофитной водоросли
L. aecidioides проявляет цитотоксическое действие на
прокариотические клетки *Escherichia coli* и не ока-
зывает токсического воздействия на эукариотиче-
ские клетки *Clarias gariepinus*. Согласно данным
микроядерного теста можно предположить благо-
приятную освещенность для содержания африкан-
ского клариевого сома около 2–8 мкмоль/м²·с⁻¹
(150–600 люкс), а частоту встречаемости микро-
ядер, принятую как отсутствие генотоксического
эффекта, в диапазоне 0–30 ‰.

Список источников

1. Усов А. И., Билан М. И. Фукоиданы – сульфатиро-
ванные полисахариды бурых водорослей // Успехи хи-
мии. 2009. Т. 78. № 8. С. 846–862.
2. Вафина Л. X., Подкорытова А. В. Новые продукты
функционального питания на основе биоактивных ком-
понентов бурых водорослей // Изв. ТИПРО. 2009. Т. 156.
С. 348–356.
3. Ferreres F., Lopes G., Gil-Izquierdo A., Andrade P. B.,
Sousa C., Mougá T., Valentão P. Phlorotannin extracts from
fucalae characterized by HPLC-DAD-ESI-MSⁿ: approaches
to hyaluronidase inhibitory capacity and antioxidant proper-
ties // Marine Drugs. 2012. V. 10. P. 2766–2781. DOI:
10.3390/md10122766.
4. Williams D. L. Overview of (1→3)-β-D-glucan im-
munobiology // Mediators of inflammation. 1997. V. 6. N. 4.
P. 247–250.
5. Cheung N. K. V., Modak S., Vickers A., Knuckles B.
Orally administered β-glucans enhance anti-tumor effects
of monoclonal antibodies // Cancer Immunology and Immu-
notherapy. 2002. V. 51 (10). P. 557–564.
6. Fritig B., Heitz T., Legrand M. Antimicrobial proteins
in induced plant defense // Curr. Opin. Immunol. 1998.
V. 10. P. 16–22. DOI: 10.1016/s0952-7915(98)80025-3.
7. van Loon L. C., van Strien E. A. The families of patho-
genesis related proteins, their activities, and comparative
analysis of PR-1 type proteins // Physiol. Mol. Plant Pathol.
1999. V. 55. P. 85–97. DOI: 10.1006/pmpp.1999.0213.
8. Li B., Lu F., Wei X., Zhao R. Fucoidan: structure
and bioactivity // Molecules. 2008. V. 13 (8). P. 1671–1695.
DOI: 10.3390/molecules13081671.
9. Вишук О. С., Ермакова С. П., Тин Фам Дюк, Шев-
ченко Н. М., Ли Буи Минг, Звягинцева Т. Н. Противоопу-
- холевая активность фукоиданов бурых водорослей // Ти-
хоокеан. мед. журн. 2009. Т. 3. С. 83–86.
10. Čmiková N., Galovičová L., Miškeje M., Borotová P.,
Kluz M., Kačániová M. Determination of Antioxidant, An-
timicrobial Activity, Heavy Metals and Elements Content
of Seaweed Extracts // Plants. 2022. V. 11. P. 1–19.
<https://doi.org/10.3390/plants11111493>.
11. Cai J., Yang D., Zhang J., Guo J., Jiang L. Evaluation
of bio-guided fraction from *Laminaria japonica* as a natural
food preservative based on antimicrobial activity // Journal
of Food Measurement and Characterization. 2020. V. 14.
P. 735–748. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00320-3>.
12. Ширина Ю. М., Конькова А. В., Файзулина Д. Р.,
Богатов И. А. Стратегия развития кормопроизводства
в условиях санкционной политики // Каспий и глобаль-
ные вызовы: материалы Междунар. науч.-практ. конф.
(Астрахань, 23–24 мая 2022 г.). Астрахань: Изд-во АГУ,
2022. С. 586–589.
13. Крупнова Т. Н. Биология, распространение, куль-
тивирование и воспроизводство бурых водорослей. Фуко-
иданы – сульфатированные полисахариды бурых водорос-
лей. Структура, ферментативная трансформация и биоло-
гические свойства. Владивосток: Дальнаука, 2014. 380 с.
14. Skriptsova A. V. Nitrogen Effect on Water-Soluble
Polysaccharide Accumulation in *Streblonema* sp. (Ectocar-
pales, Phaeophyceae) // Marine Biotechnology. 2017. V. 19.
P. 410–419. <https://doi.org/10.1007/s10126-017-9759-3>.
15. Скрипцова А. В., Калита Т. Л. Первая находка
бурой эндофитной водоросли *Laminariocolax aecidioides*
(Rosenvinge) A. F. Peters, 1998 в дальневосточных морях
России // Биология моря. 2020. Т. 46. № 1. С. 45–52. DOI:
10.31857/S013434752001009X.

16. Котова В. Ю., Манухов И. В., Завильгельский Г. Б. Lux-биосенсоры для детекции SOS-ответа, теплового шока и окислительного стресса // Биотехнология. 2009. № 6. С. 36–45. DOI: 10.1134/S0003683810080089.

17. Абилев С. К., Котова В. Ю., Смирнова С. В., Шапиро Т. Н., Завильгельский Г. Б. Специфические lux-биосенсоры *Escherichia coli*, содержащие плазмиды pRecA::lux, pColD::lux и pDinI::lux, для детекции генотоксичных агентов // Генетика. 2020. Т. 56, № 6. С. 648–656. DOI: 10.31857/S0016675820060028.

18. Игонина Е. В., Марсова М. В., Абилев С. К. Lux-биосенсоры: скрининг биологически активных соединений на генотоксичность // Экологическая генетика. 2016. Т. 14. № 4. С. 52–62. DOI: 10.17816/ecogen14452-62.

19. Kochetkov N. I., Smorodinskaya S. V., Nikiforov-Nikishin D. L., Klimov V. A., Golovacheva N. A., Nikiforov-Nikishin A. L., Grozesku Yu. N. Evaluating possible genotoxicity of three feed additives recommended for aquaculture by using micronucleus test on *Danio rerio* erythrocytes // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2022. V. 3. P. 48–59.

20. Witeska M. Erythrocytes in teleost fishes: a review // Zoology and Ecology. 2013. V. 23 (4). P. 275–281. DOI: 10.1080/21658005.2013.846963.

21. Harabawy A. S. A., Ibrahim A. T. A. Sublethal toxicity of carbofuran pesticide on the African catfish *Clarias gariepi-*

mus (Burchell, 1822): Hematological, biochemical and cytogenetic response // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2014. V. 103. P. 61–67. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.09.022.

22. Nwani C. D., Somdare P. O., Ogueji E. O., Nwani J. C., Ukonze J. A., Nwadinigwe A. O. Genotoxicity assessment and oxidative stress responses in freshwater African catfish *Clarias gariepinus* exposed to fenthion formulations // Drug and Chemical Toxicology. 2016. V. 40 (3). P. 273–280. DOI: 10.1080/01480545.2016.1209772.

23. Alimba C. G., Ajiboye R. D., Fagbenro O. S. Dietary ascorbic acid reduced micronucleus and nuclear abnormalities in *Clarias gariepinus* (Burchell 1822) exposed to hospital effluent // Fish Physiology and Biochemistry. 2017. V. 43. P. 1325–1335. DOI: 10.1007/s10695-017-0375-y.

24. Akremi N., Cappoen D., Anthonissen R., Verschaeve L., Bouraoui A. Phytochemical and in vitro antimicrobial and genotoxic activity in the brown algae *Dictyopteris membranacea* // South African Journal of Botany. 2017. V. 108. P. 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.08.009>.

25. Bello A., Padmanabhan S., Thangamalai R., Lakshmanan K., Nagarajan K. Evaluation of genotoxic effects of methanolic extract of brown seaweed *Stoechospermum marginatum* // The Journal of Phytopharmacology. 2019. V. 8 (5). P. 226–231. DOI: 10.31254/phyto.2019.8504.

References

1. Usov A. I., Bilan M. I. Fukoidany – sul'fatirovannye polisakharidy burykh vodoroslei [Fucoidans are sulfated polysaccharides of brown algae]. *Uspekhi khimii*, 2009, vol. 78, no. 8, pp. 846–862.

2. Vafina L. Kh., Podkorytova A. V. Novye produkty funktsional'nogo pitaniia na osnove bioaktivnykh komponentov burykh vodoroslei [New functional nutrition products based on bioactive components of brown algae]. *Izvestiia TINRO*, 2009, vol. 156, pp. 348–356.

3. Ferreres F., Lopes G., Gil-Izquierdo A., Andrade P. B., Sousa C., Mougá T., Valentão P. Phlorotannin extracts from fuciales characterized by HPLC-DAD-ESI-MSn: approaches to hyaluronidase inhibitory capacity and antioxidant properties. *Marine Drugs*, 2012, vol. 10, pp. 2766–2781. DOI: 10.3390/md10122766.

4. Williams D. L. Overview of (1→3)-β-D-glucan immunobiology. *Mediators of inflammation*, 1997, vol. 6, no. 4, pp. 247–250.

5. Cheung N. K. V., Modak S., Vickers A., Knuckles B. Orally administered β-glucans enhance anti-tumor effects of monoclonal antibodies. *Cancer Immunology and Immunotherapy*, 2002, vol. 51 (10), pp. 557–564.

6. Fritig B., Heitz T., Legrand M. Antimicrobial proteins in induced plant defense. *Curr. Opin. Immunol.*, 1998, vol. 10, pp. 16–22. DOI: 10.1016/s0952-7915(98)80025-3.

7. van Loon L. C., van Strien E. A. The families of pathogenesis related proteins, their activities, and comparative analysis of PR-1 type proteins. *Physiol. Mol. Plant Pathol.*, 1999, vol. 55, pp. 85–97. DOI: 10.1006/pmpp.1999.0213.

8. Li B., Lu F., Wei X., Zhao R. Fucoidan: structure and bioactivity. *Molecules*, 2008, vol. 13 (8), pp. 1671–1695. DOI: 10.3390/molecules13081671.

9. Vishchuk O. S., Ermakova S. P., Tin Fam Diuk, Shevchenko N. M., Li Bui Ming, Zviagintseva T. N. Protivoopukholevaia aktivnost' fukoidanov burykh vodoroslei [Antitumor activity of fucoidans of brown algae]. *Tikhookeanskii meditsinskii zhurnal*, 2009, vol. 3, pp. 83–86.

10. Čmiková N., Galovičová L., Miškeje M., Borotová P.,

Kluz M., Kačániová M. Determination of Antioxidant, Antimicrobial Activity, Heavy Metals and Elements Content of Seaweed Extracts. *Plants*, 2022, vol. 11, pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/plants11111493>.

11. Cai J., Yang D., Zhang J., Guo J., Jiang L. Evaluation of bio-guided fraction from *Laminaria japonica* as a natural food preservative based on antimicrobial activity. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, vol. 14, pp. 735–748. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00320-3>.

12. Shirina Iu. M., Kon'kova A. V., Faizulina D. R., Bogatov I. A. Strategiiia razvitiia kormoproizvodstva v usloviakh sanktsionnoi politiki [Strategy for the development of feed production in the context of sanctions policy]. *Kaspii i global'nye vyzovy: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Astrakhan', 23–24 maia 2022 g.)*. Astrakhan', Izd-vo AGU, 2022. Pp. 586–589.

13. Krupnova T. N. *Biologiya, rasprostranenie, kul'tivirovanie i vosproizvodstvo burykh vodoroslei. Fukoidany – sul'fatirovannye polisakharidy burykh vodoroslei. Struktura, fermentativnaia transformatsiia i biologicheskie svoistva* [Biology, distribution, cultivation and reproduction of brown algae. Fucoidans are sulfated polysaccharides of brown algae. Structure, enzymatic transformation and biological properties]. Vladivostok, Dal'nauka, 2014. 380 p.

14. Skriptsova A. V. Nitrogen Effect on Water-Soluble Polysaccharide Accumulation in *Streblonema* sp. (Ectocarpales, Phaeophyceae). *Marine Biotechnology*, 2017, vol. 19, pp. 410–419. <https://doi.org/10.1007/s10126-017-9759-3>.

15. Skriptsova A. V., Kalita T. L. Pervaia nakhodka buroi endofitnoi vodorosli *Laminariocolax aecidioides* (Rosenvinge) A. F. Peters, 1998 v dal'nevostochnykh moriakh Rossii [The first discovery of the brown endophytic algae *Laminariocolax aecidioides* (Rosenvinge) A. F. Peters, 1998 in the Far Eastern seas of Russia]. *Biologiya moria*, 2020, vol. 46, no. 1, pp. 45–52. DOI: 10.31857/S013434752001009X.

16. Kotova V. Iu., Manukhov I. V., Zavi'l'gel'skii G. B. Lux-biosensory dlia detektsii SOS-otveta, teplovogo shoka i okislitel'nogo stressa [Lux biosensors for detection of SOS

response, heat shock and oxidative stress]. *Biotechnologiya*, 2009, no. 6, pp. 36-45. DOI: 10.1134/S0003683810080089.

17. Abilev S. K., Kotova V. Iu., Smirnova S. V., Shapiro T. N., Zavit'gel'skii G. B. Spetsificheskie lux-biosensory *Escherichia coli*, sodержashchie plazmidy pRecA::lux, pColD::lux i pDinI::lux, dlia detektsii genotoksichnykh agentov [Escherichia coli specific lux biosensors containing pRecA::lux, pol::lux and prima::lux plasmids for the detection of genotoxic agents]. *Genetika*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 648-656. DOI: 10.31857/S0016675820060028.

18. Igonina E. V., Marsova M. V., Abilev S. K. Lux-biosensory: skrining biologicheskii aktivnykh soedinenii na genotoksichnost' [Lux biosensors: screening of biologically active compounds for genotoxicity]. *Ekologicheskaya genetika*, 2016, vol. 14, no. 4, pp. 52-62. DOI: 10.17816/ecogen14452-62.

19. Kochetkov N. I., Smorodinskaya S. V., Nikiforov-Nikishin D. L., Klimov V. A., Golovacheva N. A., Nikiforov-Nikishin A. L., Grozesku Yu. N. Evaluating possible genotoxicity of three feed additives recommended for aquaculture by using micronucleus test on *Danio rerio* erythrocytes. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, 2022, vol. 3, pp. 48-59.

20. Witeska M. Erythrocytes in teleost fishes: a review. *Zoology and Ecology*, 2013, vol. 23 (4), pp. 275-281. DOI: 10.1080/21658005.2013.846963.

21. Harabawy A. S. A., Ibrahim A. T. A. Sublethal toxicity of carbofuran pesticide on the African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822): Hematological, biochemical and cytogenetic response. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, vol. 103, pp. 61-67. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.09.022.

22. Nwani C. D., Somdare P. O., Ogueji E. O., Nwani J. C., Ukonze J. A., Nwadinigwe A. O. Genotoxicity assessment and oxidative stress responses in freshwater African catfish *Clarias gariepinus* exposed to fenthion formulations. *Drug and Chemical Toxicology*, 2016, vol. 40 (3), pp. 273-280. DOI: 10.1080/01480545.2016.1209772.

23. Alimba C. G., Ajiboye R. D., Fagbenro O. S. Dietary ascorbic acid reduced micronucleus and nuclear abnormalities in *Clarias gariepinus* (Burchell 1822) exposed to hospital effluent. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2017, vol. 43, pp. 1325-1335. DOI: 10.1007/s10695-017-0375-y.

24. Akremi N., Cappoen D., Anthonissen R., Verschaeve L., Bouraoui A. Phytochemical and in vitro antimicrobial and genotoxic activity in the brown algae *Dictyopteris membranacea*. *South African Journal of Botany*, 2017, vol. 108, pp. 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.08.009>.

25. Bello A., Padmanabhan S., Thangamalai R., Lakshmanan K., Nagarajan K. Evaluation of genotoxic effects of methanolic extract of brown seaweed *Stoechospermum marginatum*. *The Journal of Phytopharmacology*, 2019, vol. 8 (5), pp. 226-231. DOI: 10.31254/phyto.2019.8504.

Статья поступила в редакцию 09.07.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 14.02.2024
The article was submitted 09.07.2023; approved after reviewing 12.09.2023; accepted for publication 14.02.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Анастасия Алексеевна Климук – младший научный сотрудник факультета биотехнологий и рыбного хозяйства; Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет); klimukanastasia27@gmail.com

Аделя Джуманияшевна Жандалгарова – кандидат сельскохозяйственных наук; доцент кафедры аквакультуры и водных биоресурсов; Астраханский государственный технический университет; zhandalgarova@mail.ru

Татьяна Львовна Калита – кандидат биологических наук; доцент факультета биотехнологий и рыбного хозяйства; Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет); t.kalita@mgutm.ru

Елена Викторовна Игонина – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории экологической генетики; Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова Российской академии наук; iev555@ya.ru

Евгений Олегович Кузьменко – аспирант факультета биотехнологий и рыбного хозяйства; Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет); kuzmenko_zhenia@mail.ru

Anastasia A. Klimuk – Junior Researcher of Faculty of Biotechnology and Fisheries; K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University); klimukanastasia27@gmail.com

Adelya D. Zhandalgarova – Candidate of Agricultural Sciences; Assistant Professor of the Department of Aquaculture and Water Bioresources; Astrakhan State Technical University; zhandalgarova@mail.ru

Tatyana L. Kalita – Candidate of Biological Sciences; Assistant Professor of the Faculty of Biotechnology and Fisheries; K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University); t.kalita@mgutm.ru

Elena V. Igonina – Candidate of Biological Sciences; Researcher of the Laboratory of Ecological Genetics; Vavilov Institute of General Genetics Russia Academy of Sciences; iev555@ya.ru

Evgeny O. Kuzmenko – Postgraduate Student of the Faculty of Biotechnology and Fisheries; K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University); kuzmenko_zhenia@mail.ru



Научная статья
УДК 597.423:639.3:639.3.034
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-1-72-78>
EDN IFYBXJ

Влияние смещения половых циклов на репродуктивные характеристики самок сибирского осетра и рыбоводно-биологические характеристики молоди

Александр Павлович Воробьев[✉],
Евгений Алексеевич Мельченков, Вера Вениаминовна Калмыкова

Филиал по пресноводному рыбному хозяйству ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»,
пос. Рыбное, Московская обл., Россия, innovazii-vniiprh@mail.ru[✉]

Аннотация. Современные индустриальные рыбоводные предприятия располагают различным специализированным рыбоводным оборудованием, позволяющим искусственно регулировать режим выращивания рыбы, в том числе выводить производителей в преднерестовое состояние в необходимые для рыбоводов сроки. В связи с этим возник определенный интерес к оценке влияния условий выращивания и содержания производителей сибирского осетра на продуцируемое ими потомство. В процессе работы моделировались различные абиотические и биотические факторы среды с использованием экспериментальных баз Филиала по пресноводному рыбному хозяйству ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («ВНИИПРХ»). В опытах участвовали самки сибирского осетра 6-го поколения доместикиции генерации 2008 г. Прирост массы самок положительно отражается на их относительной и индивидуальной плодовитости. После резорбции относительная плодовитость уменьшается. С возрастом икра у самок становится крупнее, но разница по массе тела молоди, полученной от более мелкой икры, после подращивания составляет всего 13 %. Коэффициент массонакопления за весь период выращивания молоди изменяется по группам от 0,088 до 0,094, что составляет 46,3–49,4 % от максимально возможной. При проведении сравнительного анализа выращивания всех групп самок отмечено, что связь между длительностью межнерестового интервала, равной 285 или 600 суток, с суммой тепла за этот период (4 970–5 124 и 10 095 градусо-дней) и относительной плодовитостью не прослеживается. На основании проведенных исследований показано, что смещение сроков протекания процесса гаметогенеза под влиянием форс-мажорных обстоятельств не отражается на качестве половых продуктов и получаемом потомстве.

Ключевые слова: сибирский осетр, самки, межнерестовый интервал, резорбция, молодь, коэффициент массонакопления, градусо-дни

Для цитирования: Воробьев А. П., Мельченков Е. А., Калмыкова В. В. Влияние смещения половых циклов на репродуктивные характеристики самок сибирского осетра и рыбоводно-биологические характеристики молоди // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 1. С. 72–78. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-1-72-78>. EDN IFYBXJ.

Original article

Effect of sexual cycle shift on Siberian sturgeon females reproductive characteristics and fish-breeding and biological characteristics of juveniles

Alexander P. Vorob'yov[✉],
Evgeny A. Melchenkov, Vera V. Kalmykova

Branch for the Freshwater Fisheries Russian Federal “Research Institute of Fisheries and Oceanography”,
Rybnoye, Moscow region, Russia, innovazii-vniiprh@mail.ru[✉]

Abstract. Modern industrial fish farms have specialised fish-breeding equipment that allows them to artificially regulate fish rearing, such as getting spawners into a pre-spawning stage at the time required by fish farmers. In this con-